Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

Research Article
Vol. 36, No. 6, Feb.-Mar., 2023, p. 773-785

Three-year Effects of Conservation Tillage and Cover Crop on Selected Soil Quality Indicators and Corn Yield Components

M. Nael[1*], S.S. Salehi[2], J. Hamzei[3], M. Zandi Baghche-Maryam[4]

Received: 20-08-2022
Revised: 04-11-2022
Accepted: 27-11-2022
Available Online: 22-02-2023

How to cite this article:
Nael, M., Salehi, S.S., Hamzei, J., & Zandi Baghche-Maryam, M. (2023). Three-year Effects of Conservation Tillage and Cover Crop on Selected Soil Quality Indicators and Corn Yield Components. *Journal of Water and Soil 36*(6): 773-785. (In Persian with English abstract)
DOI: 10.22067/jsw.2022.78321.1195

Introduction

Conservation Agriculture (CA), as a sustainable cultivation system, aims at efficient use of natural resources with least environmental impacts, while achieving food security through increasing yield and crop diversification. CA consists of three main principles: 1- reduction or elimination of mechanical soil disturbance; 2- maintaining a permanent cover of crop residues on soil; and 3- diversification of crops. However, the total area under CA in Iran is less than 5% of arable lands. In Hamedan province, CA is mostly implemented in rainfed farming. Therefore, there is a necessity to expand CA in irrigated areas. Nonetheless, a lack of sufficient technical and local knowledge about CA acts as a barrier for its expansion in irrigated lands. Despite the large body of research conducted on CA, there is no detailed information about the combined effects of cover crops and conservation tillage systems on soil functioning and corn productivity in semi-arid regions of Hamedan province. Therefore, our aim was to study three-year effects of conservation tillage practices (no tillage and minimum tillage) and cover crops (hairy vetch and grass pea) on selected soil quality indicators and yield components of corn in a clay loam soil of a semi-arid region in Hamedan.

Materials and Methods

Combined effects of various tillage practices and cover crops on selected soil quality indicators and corn productivity were examined in a three-year experiment conducted in the research field of Bu-Ali Sina University. A factorial experiment in the basis ofbased on randomized complete block design with 3 replications and 2 factors were carried out, in which three levels of tillage practices (no tillage (NT), minimum tillage (MT), and conventional tillage (CT)), and three levels of cover crops (hairy vetch (V), grass pea (L), and no cover crop) were the imposed treatments. Surface soil samples (0-15 cm) were collected two weeks after corn harvesting in the third year of experiment. Total organic carbon (TOC), organic carbon stock (CS), active carbon (AC), carbon management index (CMI), basal respiration (BR), alkaline phosphatase activity (APA), bulk density (BD), mean weight diameter of water-stable aggregates (MWD), and available phosphorous (P) and potassium (K) were determined. Corn yield components (including number of kernel rows per corn, number of grains per corn row, ear cob weight, hundred weight of grains, ear weight, grain weights per ear, biological yield and grain yield) were measured.

Results and Discussion

The highest TOC (0.96%), CS (18.7 ton/ha), AC (398 mg/kg), CMI (74.8), BR (0.118 mgCO_2/g.d) and MWD (1.82 mm) were observed in MT treatment. However, no significant difference was detected between MT and CT in terms of AC, CS and CMI. Moreover, the lowest TOC (0.74%) was measured in NT, which showed

1, 2 and 4- Assistant Professor, Master's Degree and Ph.D. Student in Soil Science Department, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran, respectively.
(*- Corresponding Author Email: m.nael@basu.ac.ir)
3- Associate Professor, Agronomy and Plant Breeding Department, Faculty of Agriculture, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

no significant difference with CT treatment (0.83%). Reduced destruction of soil structure coupled with the increased MWD, and increased inputs of crop residues through MT, resulted in the protection of organic matter against microbial decomposition. Soil structuring, represented by BD, was improved under conservation tillage treatments (NT and MT).

Among cover crops, hairy vetch treatment demonstrated the highest TOC (1.0%), CS (19.5 ton/ha), AC (427 mg/kg), CMI (80.3) and MWD (1.73 mm). However, these indicators, except CMI, were not significantly different between the two cover crops. On the contrary, these indicators were lowest in the control (no cover crop). Moreover, AC and CMI were not significantly different between grass pea and the control. Carbon stock was increased by 54 and 40% in hairy vetch and grass pea treatments, respectively, relative to the control. In general, cover crop cultivation combined with conservation tillage practices introduced additional biomass to the soil which in turn improved soil organic matter over time and enhanced soil quality.

The lowest amounts of biological yield (1663 g/m^2), grain yield (507 g/m^2), hundred weight of grains 11.0 g), ear weight (91.4 g), grain weights per ear (62.9 g), and number of kernel rows per corn (13) were measured in CT system. In contrast, the highest grain yield (637 g/m^2), hundred grain weight (13.6 g), ear weight (108.4 g), and grain weights per ear (81.9 g) were measured in NT treatment. However, the biological yield showed no significant difference between NT and CT. Soil quality improvement in conservation tillage treatments explains the enhancement of certain yield components. Biological yield and number of grains per row demonstrated significant difference between cover crop treatments; the maximum of biological yield (2103 g/m^2) and of number of grains per row (44) was measured in hairy vetch treatment. Moreover, the lowest of biological yield (1589 g/m^2) was observed in the control (no cover crop) treatment.

Conclusion

All soil quality indicators, except available P, were improved under MT as compared with CT. Our three-year study revealed that among conservation tillage treatments, MT improved majority of soil quality indicators compared to NT. Therefore, minimum tillage practice seems to be more sustainable in this study area. Conservation tillage treatments (MT and NT) also enhanced corn grain yield, grain weights per ear and number of grain rows per ear compared to to the CT. Both cover crops improved most soil quality indicators. Moreover, both cover crops induced significant effect on biological yield, although hairy vetch was more effective than grass pea. The integration of minimum tillage with hairy vetch cover crop is considered as a sustainable cropping system for the improvement of soil quality and corn yield in this area.

Keywords: Conservation agriculture, Minimum tillage, No tillage, Soil organic carbon

Journal of Water and Soil
https://jsw.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۳۶، شماره ۶، بهمن-اسفند ۱۴۰۱، ص. ۷۸۵-۷۷۳

پیامد سه‌ساله خاک‌ورزی حفاظتی و گیاه پوششی بر برخی شناسه‌های کیفیت خاک و اجزاء عملکرد ذرت

محسن نائل[۱*]- سیده صبا صالحی[۲]- جواد حمزه‌ئی[۳]- مرضیه زندی باغچه مریم[٤]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۹
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۰۶

چکیده

بهره‌گیری از خاک‌ورزی حفاظتی و کاشت گیاهان پوششی در چارچوب کشاورزی حفاظتی نه تنها در بلند مدت به حفظ منابع خاک و آب کمک می‌کند بلکه می‌تواند به پایداری تولید نیز بیانجامد. به منظور مقایسه اثر روش‌های مختلف خاک‌ورزی حفاظتی و گیاهان پوششی بر برخی شناسه‌های کیفیت خاک و اجزاء عملکرد ذرت، یک آزمایش مزرعه‌ای سه‌ساله به صورت طرح فاکتوریل دو عاملی در قالب طرح بلوک‌های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. نظام خاک‌ورزی در سه سطح (بی‌خاک‌ورزی، کم‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم) و گیاه پوششی در سه سطح (ماشک گل‌خوشه‌ای، خلر و بدون گیاه پوششی) اجرا شدند. ادوات مورد استفاده در خاک‌ورزی مرسوم شامل گاوآهن برگردان‌دار و دیسک، در کم‌خاک‌ورزی شامل گاوآهن چیزل، و در بی‌خاک‌ورزی صرفا از دروگر برای درو کردن گیاه پوششی استفاده شد. نمونه‌برداری از خاک سطحی (۱۵-۰ سانتی متر) در سال سوم آزمایش و پس از برداشت ذرت انجام گرفت. مقدار کربن آلی کل، ذخیره کربن خاک[۵]، کربن فعال[۶]، شاخص مدیریت کربن[۷]، تنفس پایه[۸]، فسفر و پتاسیم فراهم، جرم مخصوص ظاهری، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در آب و فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی تعیین شد. به‌جز فسفر فراهم، سایر شناسه‌های کیفیت خاک در نظام کم‌خاک‌ورزی، در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم، بهبود یافت. با این حال، این دو تیمار تفاوت معنی‌داری از نظر کربن فعال، ذخیره کربن و شاخص مدیریت کربن نشان ندادند. به علاوه، کمترین مقادیر کربن آلی کل (۰/۷۴ درصد) در تیمار بی‌خاک‌ورزی دیده شد، که تفاوت معنی‌داری با تیمار خاک‌ورزی مرسوم (۰/۸۳ درصد) نداشت. نظام کم‌خاک‌ورزی با افزایش میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار و انباشت بقایای گیاهی، در نگهداشت کربن آلی خاک موثر بود. نظام کم‌خاک‌ورزی در مقایسه با بی‌خاک‌ورزی، باعث بهبود اغلب شناسه‌های کیفیت خاک شد. هر دو گیاه پوششی باعث بهبود اغلب شناسه‌های کیفیت خاک، در مقایسه با شاهد شدند. هرچند گیاه ماشک، در مقایسه با خلر، به طور مؤثرتری باعث بهبود شاخص مدیریت کربن شد. ذخیره کربن در تیمار ماشک و خلر، به ترتیب ۵۴ و ۴۰ درصد بیشتر از تیمار بدون گیاه پوششی بود. در خاک‌ورزی مرسوم، کمترین مقدار عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه، وزن صد دانه، وزن بلال، وزن دانه در بلال و تعداد ردیف دانه در بلال مشاهده شد. در مقابل، بیشترین مقدار عملکرد دانه، وزن صد دانه، وزن بلال و وزن دانه در بلال در تیمار بی‌خاک‌ورزی مشاهده شد. با این حال، تفاوت معنی‌داری بین دو تیمار خاک‌ورزی حفاظتی (بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی) از نظر عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه، وزن بلال و تعداد ردیف دانه در بلال وجود نداشت. از طرف دیگر، تأثیر گیاه پوششی بر عملکرد بیولوژیک و تعداد دانه در ردیف بلال معنی‌دار بود، به طوری که بیشترین مقدار این دو صفت در تیمار ماشک گل‌خوشه‌ای مشاهده

۱، ۲ و ۴- به‌ترتیب استادیار دانش‌آموخته کارشناس ارشد و دانشجوی دکتری گروه علوم و مهندسی خاک، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران
(*- نویسنده مسئول: (Email: m.nael@basu.ac.ir
۳- دانشیار گروه زراعت و اصلاح نباتات، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

DOI: 10.22067/jsw.2022.78321.1195

5- Soil (organic) Carbon Stock
6- Active Carbon
7- Carbon Management Index
8- Basal Respiration

شد. در کل، تلفیق کم‌خاک‌ورزی و گیاه پوششی ماشک گل‌خوشه‌ای به عنوان مناسب‌ترین نظام کشت از نظر بهبود شناسه‌های کیفیت خاک و عملکرد ذرت در منطقه مورد مطالعه معرفی می‌گردند.

واژه های کلیدی: بی‌خاک‌ورزی، کربن آلی خاک، کشاورزی حفاظتی، کم‌خاک‌ورزی

مقدمه

کشاورزی حفاظتی به عنوان یکی از انواع نظام‌های کشاورزی پایدار سعی در استفاده بهینه و پایدار از منابع طبیعی، کم کردن اثرات مخرب زیست‌محیطی، و برقراری امنیت غذایی دارد (Pradhan *et al*., 2018). این نظام از سه طریق به اهداف فوق دست می‌یابد: ۱- کاهش و یا حذف خاک‌ورزی؛ ۲- ایجاد و حفظ یک پوشش دائم از بقایای گیاهی و ۳- ایجاد تنوع گونه‌ای در کشت. بر خلاف نظام کشاورزی مرسوم، کشاورزی حفاظتی با بهبود شرایط فیزیکی، حاصلخیزی و زیست‌شناختی خاک از یک طرف، و کنترل اکولوژیک آفات و بیمارها از طرف دیگر، نه تنها پایداری اکولوژیک نظام‌های کشت را افزایش می‌دهد، بلکه در طولانی مدت پایداری اقتصادی و عملکرد محصول را نیز تضمین می‌کند (Page *et al*., 2020). با این حال، این نظام کشاورزی در کمتر از ۵ درصد از اراضی کشور در حال اجراست (Latifi *et al*., 2021). در استان همدان، کشاورزی حفاظتی بیشتر در اراضی دیم اجرا می‌شود، بنابراین ضرورت توسعه آن در اراضی آبی حائز اهمیت است. با این حال، نبود دانش کافی در زمینه جزئیات نحوه اجرای این نظام کشاورزی، مانع توسعه آن در استان شده است.

خاک‌ورزی حفاظتی (شامل بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی) از مؤلفه‌های اصلی کشاورزی حفاظتی است که با کاهش به‌هم‌خوردگی خاک و حفظ بقایای گیاهی، در ابتدا به بهبود شاخص‌های فیزیکی خاک کمک می‌کند. افزایش پایداری خاکدانه‌ها، نفوذپذیری و تخلخل، کاهش تبخیر و حفظ رطوبت خاک، و حفاظت در برابر فرسایش آبی و بادی از جمله اثرات بلند مدت خاک‌ورزی حفاظتی است. به‌علاوه، این نظام خاک‌ورزی بر شاخص‌های شیمیایی و زیست‌شناختی کیفیت خاک مانند کربن آلی، فراهمی عناصر غذایی (N، P، K، Ca و Mg) و ظرفیت تبادل کاتیونی نیز تأثیر مثبت دارد (Sithole *et al*., 2016). معمولاً در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم (شخم برگردان)، بی‌خاک‌ورزی باعث افزایش مقدار مواد آلی خاک سطحی می‌شود، زیرا با بهبود خاکدانه‌سازی، مواد آلی حفظ شده در داخل خاکدانه‌ها کمتر در معرض تجزیه میکروبی قرار می‌گیرند. محققین مختلف در مطالعه تأثیر روش‌های مختلف خاک‌ورزی حفاظتی بر خاک و گیاه به نتایج گوناگونی دست یافته‌اند. در یک مطالعه دو ساله تأثیر سطوح مختلف بقایای گیاهی و روش‌های خاک‌ورزی حفاظتی بر عملکرد ذرت علوفه‌ای در یک خاک لوم رسی در شهرستان گرگان بررسی شد. نتایج این تحقیق نشان داد که عملکرد علوفه تر در تیمارهای خاک‌ورزی مرسوم و کم‌خاک‌ورزی تفاوتی نداشته، ولی در تیمار بی‌خاک‌ورزی به حداقل رسید (Asadi *et al*., 2016). این کاهش عملکرد، به اثرات منفی بی‌خاک‌ورزی در مطالعات کوتاه مدت، مانند فشردگی خاک و کاهش نفوذ ریشه نسبت داده شد. هم‌چنین، در یک مطالعه ده ساله، روش‌های مختلف خاک‌ورزی در یک خاک رسی و تحت تناوب گندم، سویا-ذرت دانه‌ای با هم مقایسه شد. نتایج نشان دادند شناسه‌های کیفیت خاک در نظام‌های بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی، نسبت به خاک‌ورزی مرسوم بهبود یافته است (Çelik *et al*., 2021).

کاشت گیاهان پوششی به همراه عملیات خاک‌ورزی حفاظتی نه تنها می‌تواند باعث بهبود کیفیت خاک گردد، بلکه می‌تواند از طریق افزایش تنوع زیستی به کاهش آفات و بیماری‌ها و نهایتاً بهبود عملکرد محصول بیانجامد. با این حال، انتخاب گیاهان پوششی مناسب با توجه به شرایط اقلیمی و خاکی هر منطقه و نیز اهداف مدیریتی صورت می‌گیرد و نیاز به تحقیقات منطقه‌ای دارد. نوری و همکاران (Nouri *et al*., 2019) اثر طولانی مدت (سی و چهار سال) دو گونه گیاه پوششی، شامل ماشک گل خوشه‌ای (*Vicia villosa*) و گندم (*Triticum aestivum* L.)، و بی‌خاک‌ورزی را بر خواص فیزیکی خاک و عملکرد پنبه بررسی کردند. یافته‌ها نشان داد کاشت طولانی مدت گیاهان پوششی می‌تواند مقدار کم بقایای گیاهی در پنبه را جبران کند و کیفیت فیزیکی خاک (پایداری و توزیع اندازه خاکدانه‌ها؛ پیوستگی، جهت‌گیری و توزیع اندازه منافذ؛ و مقاومت فیزیکی) را در نظام بی‌خاک‌ورزی بهبود بخشد. با این حال، تغییر در کیفیت فیزیکی خاک، تولید اقتصادی و پایداری زیست محیطی ممکن است تا سال‌ها پس از شروع مدیریت مشهود نباشد. این امر بیانگر اهمیت مطالعات طولانی مدت برای مشاهده نتیجه واقعی شیوه‌های مدیریت کشاورزی است. به هر روی، اثربخشی نظام بی-خاک‌ورزی وابسته به میزان ورودی بقایا است، به طوری که در نظام‌های کشتی که بقایای کمی وارد خاک می‌کنند این اثربخشی محدود است. ناکافی بودن بقایا ممکن است باعث شود تأثیر مثبت خاک‌ورزی حفاظتی بر کیفیت خاک ناچیز باشد و حتی حساسیت خاک به فشردگی و فرسایش افزایش یابد (Nouri *et al*., 2019).

پژوهش‌های متعددی در مورد جنبه‌های مختلف کشاورزی حفاظتی در نواحی مختلف اقلیمی ایران صورت گرفته است (Asadi *et al*., 2016). در استان همدان نیز مطالعات با ارزشی در این زمینه

صورت گرفته است (Hamzei Ahmadvand and Hajinia, 2015; and Borbor, 2014). با این حال، در این پژوهش‌ها عمدتا تاکید بر بررسی پاسخ‌های خاکی یا گیاهی به طور مجزا و مستقل از هم بوده است، و کمتر ابعاد مختلف کیفیت خاک و اجزاء عملکرد به صورت توأم بررسی شده است. به‌علاوه، دانش ما درباره اثر تلفیقی خاک‌ورزی‌های حفاظتی مختلف و گیاهان پوششی مختلف بر کیفیت خاک و اجزاء عملکرد ذرت در شهرستان همدان هم‌چنان ناکافی است. بنابراین، هدف از این پژوهش، بررسی اثر سه ساله خاک‌ورزی حفاظتی (شامل بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی) و گیاه پوششی (شامل ماشک گل‌خوشه‌ای و خلر) بر برخی شناسه‌های کیفیت خاک، عملکرد و اجزاء عملکرد ذرت در یک خاک لومی رسی در منطقه نیمه خشک (دستجرد) همدان بود.

مواد و روش‌ها

مشخصات منطقه و طرح آزمایشی

این پژوهش از اسفند سال ۱۳۸۹ شروع و به مدت سه سال پی در پی در مزرعه تحقیقاتی دانشکده کشاورزی دانشگاه بوعلی سینا، واقع در روستای دستجرد در فاصله ۳۷ کیلومتری از شهر همدان اجرا شد. این مزرعه دارای ارتفاع ۱۶۹۱ متر از سطح دریا، و در طول جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۱ دقیقه شرقی و عرض جغرافیای ۳۵ درجه و ۱ دقیقه شمالی قرار دارد. خاک مزرعه مورد مطالعه در زمان شروع طرح دارای پی‌اچ (واکنش) ۷/۴۵، هدایت الکتریکی ۰/۴۰۹ دسی زیمنس بر متر و بافت لوم رسی (نسبت شن، سیلت و رس به ترتیب، ۲۰، ۴۵ و ۳۵ درصد) بود. تمام عملیات زراعی در این سه سال مشابه هم بود. آزمایش به صورت فاکتوریل دو عاملی در قالب طرح بلوک-های کامل تصادفی با سه تکرار اجرا شد. عامل خاک‌ورزی در سه سطح (بی‌خاک‌ورزی، کم‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم)، و عامل گیاه پوششی در سه سطح (ماشک گل‌خوشه‌ای، خلر و بدون گیاه پوششی) اجرا شد.

عملیات زراعی و نمونه‌برداری از گیاه پوششی

از آنجایی که تمام عملیات‌های زراعی در سه سال اجرای آزمایش مشابه هم بود، در اینجا فقط عملیات زراعی سال سوم (از اسفند سال ۱۳۹۱ تا مهر ۱۳۹۲) توضیح داده خواهد شد. در سال سوم اجرای آزمایش و در اوایل اسفندماه ۱۳۹۱ پس از آماده‌سازی زمین، ماشک گل‌خوشه‌ای و خلر به ترتیب به میزان ۴۰ و ۵۰ کیلوگرم در هکتار کشت شد. در اردیبهشت ۱۳۹۲، نمونه‌برداری از گیاهان پوششی خلر و ماشک در مرحله گلدهی و به منظور تعیین مقدار بقایای گیاهی وارد شده در واحد سطح از هر یک از گیاهان پوششی صورت گرفت. بدین منظور از هر واحد آزمایشی بوته‌های موجود در ۳ متر مربع، برداشت و وزن خشک آن‌ها به‌منظور مقایسه، اندازه‌گیری شد. مقدار توده زنده گیاهی خشک (اندام هوایی) در زمان قطع کردن گیاه پوششی ۶۵۰ و ۶۳۰ گرم بر مترمربع، به ترتیب برای ماشک و خلر بود. سپس کل گیاه پوششی با توجه به نوع تیمار خاک‌ورزی، به شرحی که در زیر می آید، به خاک اضافه شد. در تیمار خاک‌ورزی مرسوم، گیاه پوششی توسط گاوآهن برگردان‌دار با خاک مخلوط شد. اما در کم‌خاک‌ورزی، گیاه پوششی توسط گاوآهن چیزل به‌صورت نیمه مخلوط به خاک اضافه شد. در تیمار بی‌خاک‌ورزی نیز کل گیاهان پوششی پس از درو به طور یکنواخت روی سطح خاک رها شد. در خاک‌ورزی مرسوم بعد از شخم با گاوآهن برگردان‌دار، از دیسک برای خرد کردن کلوخه‌ها استفاده شد و نهایتاً فارو زده شد. در دیگر تیمارها عملیات فارو اجرا نشد. ادوات مورد استفاده در خاک‌ورزی مرسوم شامل گاوآهن برگردان‌دار و دیسک، در کم‌خاک‌ورزی شامل گاو آهن چیزل، و در بی‌خاک‌ورزی صرفا از دروگر برای درو کردن گیاه پوششی استفاده شد. دو هفته پس از برگرداندن گیاهان پوششی به خاک، کشت ذرت در ردیف‌های با فاصله ۷۵ سانتی‌متر و فاصله روی هر ردیف ۱۸ سانتی‌متر به‌صورت دستی انجام گرفت. هر کرت شامل ۵ ردیف کاشت به طول ۶ متر بود. بعد از برگرداندن ماشک گل‌خوشه‌ای و خلر به خاک، با توجه به نتایج آزمایش خاک، کود پتاسیم و فسفر مصرف نشد. نیاز کودی به نیتروژن در هر یک از تیمارهای دارای گیاه پوششی، پس از کسر میزان نیتروژن افزوده شده به خاک از طریق گیاهان پوششی محاسبه شد و به شکل کود اوره، در سه مرحله (زمان کشت، ۸-۶ برگی و مرحله تاسلینگ) به خاک داده شد. برای این منظور نیاز ذرت به کود اوره معادل ۲۰۰ کیلوگرم در هکتار در نظر گرفته شد، و در تیمارهای بدون گیاه پوششی این مقدار در سه مرحله به خاک اضافه شد. برای تیمارهای دارای گیاه پوششی، ابتدا میانگین محتوای نیتروژن کل برای دو گیاه پوششی ماشک و خلر از منابع استخراج شد (۴۳/۲ گرم نیتروژن بر کیلوگرم ماده خشک برای هر دو گیاه پوششی) و در مقدار ماده خشک تولید شده از هر گیاه پوششی ضرب شد تا مقدار نیتروژن وارد شده به خاک از طریق گیاه پوششی بدست آید. سپس، باقیمانده نیاز به نیتروژن از منبع کود اوره و در سه مرحله به خاک داده شد. آبیاری به روش بارانی و هر هفته یکبار به میزان ۵۰۰ مترمکعب در هکتار در طول فصل رشد ذرت صورت گرفت.

اندازه‌گیری عملکرد و اجزاء عملکرد ذرت

پس از رسیدگی ذرت و با رعایت اثر حاشیه، صفات تعداد ردیف دانه در بلال، تعداد دانه در ردیف، وزن ۱۰۰ دانه، وزن دانه در بلال، وزن بلال و وزن چوب بلال اندازه گیری شد. عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک نیز با برداشت بوته‌های موجود در دو متر مربع تعیین شد.

نمونه‌برداری خاک و تجزیه های آزمایشگاهی

نمونه‌برداری خاک با سه تکرار و به‌صورت ترکیبی از عمق ۱۵ سانتی‌متر بالایی خاک پس از برداشت گیاه اصلی در مهرماه ۱۳۹۲ انجام گرفت. در تهیه نمونه‌های خاک ترکیبی، مقدار ثابتی از خاک از پای بوته‌ها و بین ردیف‌ها برداشت و مخلوط شد. بخشی از نمونه‌های خاک پس از هواخشک شدن، کوبیده شد و از الک دو میلی متر عبور داده شد، و ویژگی‌های کربن آلی کل به روش اکسیداسیون تر (Nelson and Sommers, 1996)، کربن فعال به روش تعیین کربن آلی قابل اکسید با محلول ۰/۰۲ مولار پرمنگنات پتاسیم (Weil *et al*., 2003)، تنفس پایه به روش اندازه گیری CO_2 آزاد شده در یک دوره انکوباسیون ۷ روزه تحت شرایط کنترل شده رطوبتی (حد گنجایش زراعی) و دمایی (۲۷ درجه سلسیوس) (Isermeyer, 1952) و فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی در حضور سوبسترای پارانیتروفنیل فسفات و انکوباسون در دمای ۳۷ درجه سلسیوس (Tabatabai and Bremner, 1969) اندازه‌گیری شد. بخش دیگری از نمونه‌های خاک پس از هواخشک شدن از الک چهار میلی‌متر عبور داده شد و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار در آب (Cambardella and Elliott, 1994) توسط سری الک‌های ۲ و ۰/۵ و ۰/۰۵۳ تعیین شد. هم چنین نمونه‌های دست‌نخورده خاک با سه تکرار و با استفاده از سیلندرهای با قطر ۵/۳ و ارتفاع ۷/۵ سانتی‌متر جمع آوری شد و جرم مخصوص ظاهری خاک (Blake and Hartge, 1986) اندازه‌گیری شد. به علاوه، مقدار ذخیره کربن با استفاده از حاصل‌ضرب کربن آلی کل، جرم مخصوص ظاهری و عمق نمونه‌برداری محاسبه شد (Akala and Lal, 2001). هم‌چنین، شاخص مدیریت کربن (CMI) با استفاده از مقدار کربن آلی کل و کربن آلی فعال، و به کمک رابطه ۱ محاسبه شد (Blair *et al*., 1995).

$$CMI = CPI \times LI \times 100 \quad (۱)$$

در این رابطه CPI[1] (شاخص ذخیره کربن) و LI[2] (شاخص پویایی کربن) از روابط زیر به دست می‌آیند:

CPI = نسبت کربن آلی کل در تیمار به کربن آلی کل در تیمار مرجع،

LI= نسبت پویایی کربن در تیمار به پویایی کربن در تیمار مرجع، که میزان پویایی کربن از تقسیم مقدار کربن پویا (کربن فعال) بر مقدار کربن پایدار (تفاضل کربن کل و کربن فعال) به دست آمد. تیمار مرجع تیماری است که بیشترین مقدار کربن آلی کل و کربن فعال (در این مطالعه، تیمار کم‌خاک‌ورزی و ماشک) در آن اندازه‌گیری شده است.

1- Carbon Pool Index
2- Lability Index

تجزیه و تحلیل داده‌ها

به‌منظور تجزیه واریانس و مقایسه میانگین‌ها، ابتدا نرمال بودن آن‌ها با آزمون کولموگروف–اسمیرنوف، ناهمبسته بودن مانده‌ها با استفاده از آزمون دوربین–واتسون، همگنی واریانس مانده‌ها با آزمون لون، در محیط نرم‌افزار R، بررسی شد. در نهایت برای مقایسه میانگین از آزمون حداقل تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد استفاده شد.

نتایج و بحث

شناسه‌های کیفیت خاک

نتایج حاصل از تجزیه واریانس داده‌ها (جدول ۱) نشان داد که اثر متقابل دو عامل خاک‌ورزی و گیاه پوششی تنها بر فعالیت آنزیم فسفاتاز معنی‌دار بود. به‌علاوه، اثر اصلی خاک‌ورزی بر کربن آلی کل، ذخیره کربن، کربن فعال، شاخص مدیریت کربن، تنفس پایه، جرم مخصوص ظاهری، میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها و مقدار پتاسیم معنی‌دار بود. همچنین اثر اصلی گیاه پوششی بر کربن آلی کل، ذخیره کربن، کربن فعال، شاخص مدیریت کربن، تنفس پایه و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها معنی‌دار بود. قابل ذکر است که هیچ یک از عوامل آزمایشی تأثیر معنی‌داری بر مقدار فسفر نداشتند (جدول ۱).

شناسه‌ی کربن آلی کل، ذخیره کربن، کربن فعال، تنفس پایه، جرم مخصوص ظاهری، MWD و شاخص مدیریت کربن

نتایج مقایسات میانگین (جدول ۲) نشان داد که در بین تیمارهای خاک‌ورزی، تیمار کم‌خاک‌ورزی (MT) دارای بیشترین مقادیر کربن آلی کل (۰/۹۶ درصد)، ذخیره کربن (۱۸/۶۷ تن بر هکتار)، کربن فعال (۳۹۸ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، شاخص مدیریت کربن (۷۴/۸)، تنفس پایه (۰/۱۱۸ میلی‌گرم CO_2 بر گرم خاک در روز) و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌های پایدار (MWD) (۱/۸۲ میلی‌متر) بود. با این حال، دو تیمار MT و خاک‌ورزی مرسوم (CT) تفاوت معنی‌داری از نظر کربن فعال، ذخیره کربن و شاخص مدیریت کربن نشان ندادند. به علاوه، کمترین مقادیر کربن آلی کل (۰/۷۴ درصد) در تیمار بی‌خاک ورزی (NT) دیده شد، که تفاوت معنی‌داری با تیمار CT (۰/۸۳ درصد) نداشت. هم‌چنین، تیمار NT دارای کمترین ذخیره کربن (۱۴/۴ تن بر هکتار) نسبت به دیگر تیمارهای خاک‌ورزی بود. این نتایج بیانگر آن است که پیامد سه ساله خاک‌ورزی حفاظتی در منطقه مطالعاتی تنها در تیمار کم‌خاک‌ورزی باعث بهبود چشمگیر شناسه‌های کیفیت خاکِ مورد بحث شده است، و به طور کلی اثر تیمار بی-خاک‌ورزی تا حد زیادی مشابه تیمار خاک‌ورزی مرسوم بوده است.

لازم به ذکر است، در تیمار بی‌خاک‌ورزی، تمام اندام‌های هوایی حاصل از گیاه اصلی و گیاه پوششی، بدون اینکه با خاک مخلوط شوند، در سطح خاک رها شدند. حال آنکه، این بقایا در صورتی می توانند به افزایش ذخایر کربن آلی خاک کمک کنند که با خاک مخلوط شده و تحت تأثیر فعالیت‌های ریزجانداران خاک تجزیه شوند. باید در نظر داشت که اقلیم نیمه‌خشک منطقه نیز در کاهش سرعت بقایای گیاهی در تیمار بی‌خاک‌ورزی نقش مؤثری دارد. در مقابل، مخلوط شدن و تجزیه بقایای سطحی و زیرسطحی با خاک در تیمار کم‌خاک‌ورزی بیشتر از سایر تیمارها است. از طرف دیگر، میانگین وزن خشک بقایای ذرت (پس از برداشت دانه) در دو سال اول اجرای طرح برابر ۷۰۰ گرم در مترمربع برای تیمار بی‌خاک‌ورزی، و ۸۰۰ گرم بر متر مربع برای دو تیمار کم‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم اندازه گیری شد (نتایج در جداول نیامده است). از این رو، به نظر می‌رسد علت کمتر بودن کربن آلی در تیمار بی‌خاک‌ورزی، علاوه بر عدم اختلاط بقایا با خاک، تا حدی مربوط به مقدار کمتر بقایای ذرت در این تیمار نیز باشد. به علاوه، کاهش خاک‌ورزی باعث حفاظت بیشتر خاکدانه‌ها و افزایش قطر خاکدانه‌های پایدار (MWD) شده است. این خاکدانه‌های پایدار محل‌های مناسبی برای نگهداشت مواد آلی و حفاظت آن‌ها در برابر تجزیه میکروبی هستند. به طور مشابه، مطالعات سوکولوفسکی و همکاران (Sokolowski *et al.*, 2020) نشان دادند که بی‌خاک‌ورزی برای جبران از دست رفتن کربن آلی خاک ناشی از کشت مداوم کافی نیست. با این حال، آن‌ها گزارش دادند که نظام‌های بی‌خاک‌ورزی قادر به کاهش اثرات منفی کشاورزی بر خصوصیات خاک هستند. از سوی دیگر، هیل و همکاران (Hiel *et al.*, 2018) بیان کردند که برگرداندن بقایا و استفاده از گیاهان پوششی به همراه کم‌خاک‌ورزی موجب بهبود میزان ماده آلی خاک و بهبود حاصلخیزی خاک می‌شود. به طور کلی، عملیات خاک ورزی مرسوم، به دلیل به‌هم‌ریختن خاک و تأثیر بر مقدار ماده آلی و توزیع آن در نیمرخ خاک می‌تواند بر کاهش پایداری خاکدانه‌ها و میانگین وزنی قطر خاکدانه‌ها مؤثر باشد.

جدول ۱- تجزیه واریانس شناسه‌های کیفیت خاک تحت تأثیر تیمارهای خاک‌ورزی و گیاه پوششی

Table 1- Analysis of variance of soil quality indicators affected by tillage and cover crop treatments

منابع تغییرات Source of variation	درجه آزادی df	کربن آلی کل Total organic carbon	کربن Active carbon	شاخص مدیریت کربن Carbon management index	ذخیره کربن Soil carbon Stock	تنفس پایه Basal respiration	جرم مخصوص Bulk density	میانگین وزنی قطر خاکدانه Mean weight diameter	فسفر P	پتاسیم K	فعالیت آنزیم فسفاتاز Phosphatase activity
تکرار Replication	2	0.133***	9710.7ns	329.5ns	64.4***	0.0096***	0.019***	0.050ns	0.687ns	918.5ns	51240ns
خاک‌ورزی Tillage (T)	2	0.106**	16485.7*	597.9*	41.1**	0.0009**	0.007**	0.341**	0.411ns	14203.3*	1604363***
گیاه پوششی Cover crop (C)	2	0.310***	28689.3**	963.1**	112.6***	0.0023***	0.001ns	0.065*	1.435ns	623.2ns	472096ns
خاک‌ورزی × گیاه پوششی T × C	4	0.008ns	1218.5ns	49.4ns	5.1ns	0.0001ns	0.001ns	0.042ns	7.177ns	2689.8ns	376378*
خطا Error	16	0.012	2881.1	106.7	4.3	0.0001	0.001	0.014	2.702	2404.2	100162
ضریب تغییرات (درصد) Coefficient of variation (%)	-	12.8	14.5	14.8	12.5	10.2	2.4	7.11	21.1	12.6	11.0

ns، *، ** و *** به ترتیب عدم معناداری و معناداری در سطح ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ را نشان می‌دهد.

ns, *, **, and *** represent non-significant and significant differences at the probability levels of 0.05, 0.01, and 0.001, respectively.

از طرفی، نتایج جرم مخصوص ظاهری نشان می‌دهد که ساختمان خاک تا حد قابل توجهی در تیمارهای خاک‌ورزی حفاظتی (بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی)، در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم، بهبود یافته است (به ترتیب، ۱/۲۹ و ۱/۳۰ در مقابل ۱/۳۴ گرم بر سانتی‌متر مکعب). با این حال، تیمار گیاه پوششی تأثیر معنی‌داری بر این شناسه نداشت (جدول ۲). حمزه‌ئی و بوربور (Hamzei and Borbor, 2014) کاهش ۱۹ درصدی جرم مخصوص ظاهری خاک را در تیمار کم‌خاک‌ورزی نسبت به تیمار بی‌خاک‌ورزی گزارش کردند، با این حال آن‌ها بین تیمارهای خاک‌ورزی مرسوم و بی‌خاک‌ورزی تفاوت معنی‌داری مشاهده نکردند. در حالی که نتایج سوکولوفسکی و همکاران (Sokolowski *et al.*, 2020) حاکی از این بود که در نظام بی‌خاک‌ورزی در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم، جرم مخصوص ظاهری، رطوبت ثقلی و پایداری خاکدانه‌ها بالاتر بود، اما میزان رطوبت اشباع و تخلخل کل کاهش یافت. عدم تأثیر گیاه پوششی بر جرم مخصوص ظاهری در مطالعه حاضر با نتایج برخی مطالعات همخوانی نداشت (Ghaffari *et al.*, Ahmadnia *et al.*, 2020 ; 2012). احمدنیا و همکاران (Ahmadnia *et al.*, 2020) در مطالعه یک‌ساله خود بر روی یک خاک لومی نشان دادند که گیاهان پوششی خلر، ماشک گل‌خوشه‌ای و چاودار به طور معنی‌داری باعث بهبود (کاهش) وزن مخصوص ظاهری خاک شدند. به‌نظر می‌رسد عوامل

مختلفی، از جمله بافت نسبتا سنگین خاک در مطالعه حاضر (لوم رسی) مانع از آن شده باشد که این ویژگی به طور چشمگیری بهبود یابد.

نتایج مقایسات میانگین (جدول ۲) نشان داد که در بین تیمارهای گیاه پوششی، تیمار ماشک دارای بیشترین مقادیر کربن آلی کل (۱/۰ درصد)، ذخیره کربن (۱۹/۴۸ تن بر هکتار)، کربن فعال (۴۲۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم)، شاخص مدیریت کربن (۸۰/۳) و MWD (۱/۷۳ میلی‌متر) بود. با این حال، بین دو تیمار ماشک و خلر تفاوت معنی‌داری از نظر شناسه‌های فوق، به جز شاخص مدیریت کربن، دیده نشد. مقدار ذخیره کربن در تیمار ماشک و خلر، به ترتیب ۵۴ و ۴۰ درصد بیشتر از تیمار بدون گیاه پوششی بود. به‌علاوه، مقدار تنفس پایه در هر دو تیمار گیاه پوششی مشابه و به طور معنی‌داری بیشتر از شاهد (بدون گیاه پوششی) بود. در مقابل، کمترین مقادیر شناسه‌های فوق در تیمار بدون گیاه پوششی دیده شد. با این حال، این تیمار (بدون گیاه پوششی) از نظر آماری تفاوت معنی‌داری به لحاظ مقدار کربن فعال و شاخص مدیریت کربن با تیمار خلر نداشت (به ترتیب، ۳۱۴ در مقابل ۳۶۶ میلی‌گرم بر کیلوگرم و ۵۹/۷ در مقابل ۶۸/۹). این نتایج، تأثیر مثبت کشت هر دو گیاه پوششی را بر شناسه‌های کربن آلی کل، ذخیره کربن و MWD، در یک دوره سه ساله نشان می‌دهد. مقدار توده زنده گیاهی (اندام هوایی) در زمان قطع کردن دو گیاه پوششی تفاوت معنی‌داری نشان نداد (۶۵۰ و ۶۳۰ گرم بر مترمربع، به ترتیب برای ماشک و خلر) (نتایج در جداول نیامده است). از این رو، مقدار مواد آلی ورودی به خاک، از طریق گیاهان پوششی مورد مطالعه، یکسان است. در کل، حضور گیاه پوششی، به ویژه ماشک، موجب افزایش محتوای کربن آلی و به تبع آن کربن فعال خاک شده است. به طورکلی، کشت گیاه پوششی و بازگرداندن بقایا به خاک نه تنها می‌تواند به حفظ و بهبود حاصلخیزی خاک کمک کند، بلکه میزان ماده آلی خاک را به ویژه در طولانی مدت افزایش می‌دهد (Merante *et al.*, 2017). به علاوه، پژوهش‌ها نشان می‌دهند که نگهداشت کربن آلی در خاک به نوع بقایای اضافه شده و میزان تجزیه‌پذیری آنها نیز وابسته است. با این حال در مطالعه سه ساله حاضر، بین دو گیاه پوششی ماشک و خلر تفاوت معنی‌داری از نظر شناسه‌های کیفیت خاک مورد بررسی دیده نشد.

جدول ۲- میانگین (± خطای استاندارد) شناسه‌های کیفیت خاک تحت تأثیر اثرات اصلی گیاه پوششی و خاک‌ورزی

Table 2- Mean (± standard error) of selected soil quality indicators affected by main factors of cover crops and tillage

ویژگی (Property)	تیما خاک‌ورزی (Tillage treatment)			تیمار گیاه پوششی (Cover crop treatment)			حداقل تفاوت معنی‌دار Least significant difference
	CT	MT	NT	N	V	L	
کربن آلی کل Total organic carbon (%)	0.83 b (±0.12)	0.96 a (±0.12)	0.74 b (±0.11)	0.64 B (±0.1)	1.00 A (±0.08)	0.89 A (±0.09)	0.107
کربن فعال Active carbon (mg/kg)	389.4 a (±23. 2)	397.8 a (±51. 1)	319.8 b (±15.4)	313.8 B (±46.0)	426.7 A (±34.4)	366.4 AB (±34.3)	53.63
شاخص مدیریت کربن Carbon management index	73.9 a (±4.2)	74.8 a (±9.7)	60.3 b (±34.8)	59.7 B (±8)	80.3 A (±6.6)	68.9 B (±7.1)	10.32
ذخیره کربن Carbon stock (Mg/ha)	16.69 a (±2.49)	18.67 a (±2.59)	14.40 b (±2.35)	12.64 B (±2.20)	19.48 A (±1.79)	17.63 A (±2.10)	2.077
تنفس پایه Basal respiration(mg CO_2/g.d)	0.098 b (±0.008)	0.118 a (±0.006)	0.103 b (±0.009)	0.088 B (±0.009)	0.115 A (±0.006)	0.115 A (±0.005)	0.0108
جرم مخصوص ظاهری Bulk density (g/cm^3)	1.34 a (±0.02)	1.30 b (±0.03)	1.29 b (±0.02)	1.32 A (±0.02)	1.30 A (±0.02)	1.31 A (±0.04)	0.030
میانگین وزنی قطر خاکدانه Mean weight diameter (mm)	1.42 b (±0.17)	1.82 a (±0.21)	1.59 b (±0.16)	1.56 B (±0.10)	1.73 A (±0.19)	1.69 A (±0.13)	0.211
فسفر P(mg/kg)	7.92 a (±0.99)	7.88 a (±1.21)	7.53 a (±0.85)	7.69 A (±1.34)	8.21 A (±0.77)	7.43 A (±0.83)	1.642
پتاسیم K (mg/kg)	349.4 b (±48.9)	385. 8 ab (±43.5)	428.8 a (±47.6)	386.9 A (±50.4)	396.8 A (±49.4)	380.3 A (±70.5)	49.02

میانگین‌هایی که حداقل در یک حرف مشترک هستند، فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر پایه آزمون LSD می‌باشند. CT: خاک‌ورزی مرسوم، MT: خاک‌ورزی حداقل، NT: بدون خاک‌ورزی، L: خلر، V: ماشک گل‌خوشه‌ای، N: بدون گیاه پوششی.

Means with at least one similar letter are not significantly ($P<0.05$) different based on LSD test. CT: Conventional Tillage, MT: Minimum Tillage, NT: No Tillage, L: *Lathyrus sativus*, V: *Vicia villosa*, N: No cover crop.

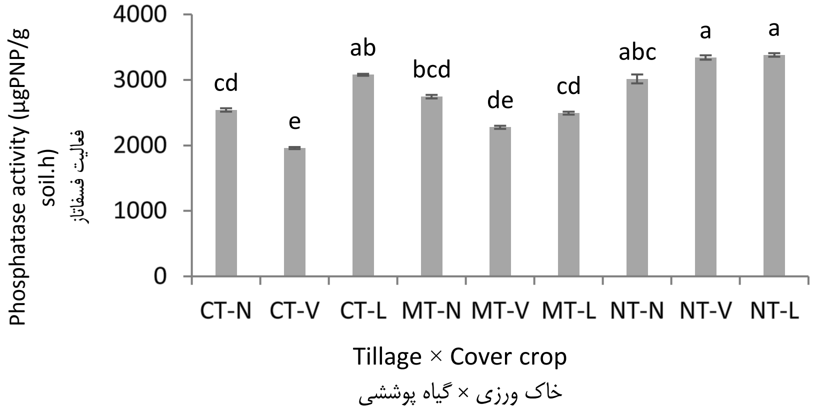
فسفر، پتاسیم و فعالیت آنزیم فسفاتاز

محتوای فسفر اولسن تحت تأثیر هیچ یک از عوامل آزمایشی قرار نداشت (جدول ۱). در این زمینه، نتایج بدست آمده از دیگر مطالعات بسیار گوناگون است. در برخی مطالعات، مقدار فسفر فراهم در خاک سطحیِ (۰ تا ۵ سانتی‌متر) نظام‌های بی‌خاک‌ورزی بیشتر از خاک ورزی مرسوم گزارش شده است (Verhulst Sithole *et al*., 2016 ; Sokolowski *et al*., 2010). در مقابل، سوکولوفسکی و همکاران (Sokolowski *et al*., 2020) گزارش کردند که نظام‌های خاک‌ورزی، فسفر، هدایت هیدرولیکی و نیتروژن کل را تحت تأثیر قرار نداده است. هم چنین افضلی گروه و همکاران (Afzali Gorouh *et al*., 2019) در مطالعه سه ساله خود در شهرستان ارزوئیه کرمان نشان دادند که مقدار فسفر در دو تیمار بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی (با چیزل) تفاوت معنی‌داری نداشت. این محققین، هم چنین تفاوت معنی‌داری در مقدار فسفر تیمارهایی که ۷۵ و ۱۰۰ درصد بقایای گیاهی داشتند مشاهده نکردند. در مقابل، بیشترین مقدار فسفر در تیماری که بقایای گیاهی کاملا سوزانده شده بود، دیده شد. به نظر می رسد علیرغم تاثیر مثبتی که هر دو عامل مورد آزمون در این مطالعه (خاک‌ورزی و گیاه پوششی) بر افزایش مواد آلی خاک داشته اند، روند معدنی شدن فسفر آلی در مدت زمان اجرای مطالعه (سه سال) نتوانسته است محتوای فسفر را نسبت به شاهد به طور معنی‌داری افزایش دهد. محتوای پتاسیم فراهم (محلول و تبادلی) تنها تحت تأثیر عامل خاک‌ورزی قرار داشت، به طوری که بیشترین مقدار آن در بی‌خاک‌ورزی (۴۲۸/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) مشاهده شد. محتوای پتاسیم در تیمار کم‌خاک‌ورزی (۳۸۵/۷ میلی‌گرم بر کیلوگرم) تفاوت معنی‌داری با تیمار بی‌خاک‌ورزی و خاک‌ورزی مرسوم (۳۴۹/۴ میلی‌گرم بر کیلوگرم) نداشت (جدول ۲). مطالعات نشان می‌دهند که غلظت پتاسیم فراهم در خاک سطحی نظام‌های خاک‌ورزی حفاظتی که بقایای غلات در آنها حفظ می‌گردد بیشتر از خاک‌هایی است که تحت خاک‌ورزی مرسوم بوده و بقایای گیاهی به آنها اضافه نمی‌شود (Palm *et al*., 2014).

بیشترین میزان فعالیت آنزیم فسفاتاز در نظام بی‌خاک‌ورزی در ترکیب با خلر (NT-L) (۳۳۸۱ میکروگرم پارانیتروفنل بر گرم خاک در ساعت) دیده شد. با این حال، این مقدار تفاوت معنی‌داری با فعالیت آنزیمی در تیمارهای NT-V، NT-N و CT-L نداشت. در مقابل، کمترین فعالیت آنزیمی در تیمار خاک‌ورزی مرسوم در ترکیب با ماشک گل‌خوشه‌ای (CT-V) (۱۹۵۹ میکروگرم بر گرم در ساعت) بود. نتایج نشان داد، هر چند اضافه کردن گیاه پوششی به نظام بی خاک‌ورزی باعث افزایش فعالیت آنزیم فسفاتاز شده است، ولی این افزایش در دوره سه ساله اجرای طرح معنی‌دار نبوده است. در نظام کم‌خاک‌ورزی نیز اضافه کردن گیاهان پوششی تفاوت معنی‌داری در فعالیت آنزیمی ایجاد نکرد (شکل ۱). این در حالی است که فعالیت آنزیم فسفاتاز به عنوان یک شاخص قابل اعتماد برای ارزیابی زودهنگام تغییرات کیفیت خاک در نظر گرفته شده است (Adetunji *et al*., 2021). آنزیم فسفاتاز از جمله آنزیم‌های برون سلولی است که علاوه بر ریزجانداران از ریشه گیاهان نیز ترشح می‌شود. از این رو افزایش توده زنده گیاهی از طریق کاشت گیاهان پوششی نه تنها می‌تواند تولید این آنزیم را افزایش دهد، بلکه می‌تواند با افزایش جمعیت و تغییر ترکیب ریز جانداران خاک فعالیت این آنزیم را در خاک افزایش دهد. با توجه به اینکه افزایش فعالیت آنزیم فسفاتاز، باعث تحریک معدنی شدن فسفر آلی شده و نهایتا به افزایش فسفر فراهم در خاک می انجامد، با این حال نتایج فسفر السن تفاوت معنی داری را در بین تیمارهای مورد مطالعه نشان نداد. یین جی و همکاران (Yin-jie *et al*., 2022) در یک مطالعه ده ساله نشان دادند که خاک‌های تحت تیمار اصلاح کننده‌های آلی در مقایسه با تیمارهای کودهای شیمیایی دارای مقادیر کمتری از فسفر کل و فسفر معدنی هستند، حال آنکه مقدار فسفر فراهم، فسفر آلی و فعالیت آنزیم فسفاتاز در این تیمارها افزایش یافته است. به نظر می رسد مطالعه بخش بندی فسفر در مطالعات بعدی بتواند رابطه بین اشکال مختلف فسفر و آنزیم فسفاتاز را در نظام‌های کشت مختلف (حفاظتی و مرسوم) روشن‌تر نماید.

عملکرد و اجزاء عملکرد ذرت

اثر متقابل عوامل آزمایشی (نظام‌های خاک‌ورزی و گیاه پوششی) بر هیچ یک از صفات عملکرد ذرت و اجزاء آن تأثیر معنی‌داری نداشت. هم چنین، وزن چوب بلال تحت تأثیر هیچ یک از عوامل آزمایشی قرار نگرفت. در مقابل، سایر صفات تحت تأثیر حداقل یکی از عوامل اصلی قرار گرفتند. به طوری که اثر تیمارهای خاک‌ورزی بر عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه، وزن صد دانه، وزن دانه در بلال، تعداد ردیف دانه در بلال و وزن بلال معنی‌دار بود (جدول ۳). به طور کلی، کمترین مقدار عملکرد بیولوژیک (۱۶۶۳ گرم بر متر مربع)، عملکرد دانه (۵۰۷ گرم بر متر مربع)، وزن صد دانه (۱۱/۰ گرم)، وزن بلال (۹۱/۸ گرم)، وزن دانه در بلال (۶۲/۹ گرم) و تعداد ردیف دانه در بلال (۱۳/۰) در تیمار خاک‌ورزی مرسوم مشاهده شد. با این حال، از نظر وزن بلال و وزن صد دانه، تفاوت معنی‌داری بین تیمار خاک ورزی مرسوم و کم‌خاک‌ورزی وجود نداشت. هم چنین، عملکرد بیولوژیک در خاک‌ورزی مرسوم و بی‌خاک‌ورزی تفاوت معنی‌داری نشان نداد (۱۶۶۳ در مقابل ۱۸۲۵ گرم بر متر مربع).



شکل ۱- مقایسه میانگین فعالیت آنزیم فسفاتاز قلیایی تحت تاثیر اثر متقابل دو عامل خاک‌ورزی و گیاه پوششی

CT: خاک‌ورزی مرسوم، MT: خاک‌ورزی حداقل، NT: بدون خاک‌ورزی، L: خلر، V: ماشک گل‌خوشه‌ای، N: بدون گیاه پوششی (آزمون LSD، α=0.05).

Figure 1. Mean comparison of phosphatase activity influenced by interaction effects of tillage and cover crop

CT: Conventional Tillage, MT: Minimum Tillage, NT: No Tillage, L: *Lathyrus sativus*, V: *Vicia villosa*, N: No cover crop.

در مقابل، بیشترین مقدار عملکرد دانه (۶۳۷ گرم بر متر مربع)، وزن صد دانه (۱۳/۶ گرم)، وزن بلال (۱۰۸/۴ گرم) و وزن دانه در بلال (۸۱/۹ گرم) در تیمار بی‌خاک‌ورزی مشاهده شد. با این حال، تفاوت معنی‌داری بین دو تیمار خاک‌ورزی حفاظتی (بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی) از نظر عملکرد بیولوژیک، عملکرد دانه، وزن بلال و تعداد ردیف دانه در بلال وجود نداشت (جدول ۴). به‌نظر می‌رسد در مطالعه سه‌ساله حاضر، تیمار بی‌خاک‌ورزی به دلیل ایجاد مؤثرِ یک مالچ از بقایای گیاهی، به نگهداشت رطوبت در خاک و جذب آن توسط گیاه کمک کرده باشد. این در حالی است که در یک مطالعه کوتاه مدت یک‌ساله، عملکرد دانه گندم در تیمار خاک‌ورزی مرسوم و حفظ ۶۰ درصد بقایای گیاهی، نسبت به تیمارهای خاک‌ورزی حفاظتی افزایش یافت (Komeili *et al.*, 2016). این محققین، نگهداشت بیشتر رطوبت خاک و جذب بیشتر رطوبت در مرحله پر شدن دانه را علت بهبود عملکرد در این تیمار دانستند.

جدول ۳- تجزیه واریانس عملکرد و اجزاء عملکرد ذرت تحت تأثیر تیمارهای خاک‌ورزی و گیاه پوششی

Table 3- Analysis of variance of yield and yield components of corn affected by tillage and cover crop treatments

منابع تغییرات **Source of variation**	درجه آزادی df	عملکرد بیولوژیک Biological yield	عملکرد دانه Grain yield	وزن بلال Ear weight	وزن دانه در بلال Grain weights per ear	وزن صد دانه Hundred grain weight	تعداد ردیف دانه در بلال Number of grain rows per ear	تعداد دانه در ردیف Number of grains per row	وزن چوب بلال Ear cob weight
تکرار Replication	2	307289^{ns}	33997**	644.5*	740.5***	3.62^{ns}	12.04*	11.111^{ns}	3.34^{ns}
خاک‌ورزی Tillage (T)	2	622460*	39087***	620.2*	811.7***	16.40***	31.59***	16.333^{ns}	30.16^{ns}
گیاه پوششی Cover crop (C)	2	641654*	5965^{ns}	149.5^{ns}	75.6^{ns}	2.00^{ns}	4.04^{ns}	25.333*	12.51^{ns}
خاک‌ورزی×گیاه پوششی T × C	4	144366^{ns}	2734^{ns}	86.4^{ns}	51.0^{ns}	1.65^{ns}	0.93^{ns}	3.833^{ns}	15.76^{ns}
خطا Error	16	150857	3552	114.1	59.8	1.35	1.99	5.736	20.46
ضریب تغییرات (درصد) Coefficient of variation (%)	-	20.6	10.3	10.7	10.6	9.6	9.1	5.6	16.8

ns، *، ** و *** به ترتیب عدم معناداری و معناداری در سطح ۰/۰۵، ۰/۰۱ و ۰/۰۰۱ را نشان می‌دهد.

ns, *, **, and *** represent non-significant and significant differences at the probability levels of 0.05, 0.01, and 0.001, respectively.

از این رو، به‌نظر می‌رسد اجرای خاک‌ورزی حفاظتی بدون حفظ بقایای گیاهی نتواند تاثیر مثبتی بر عملکرد داشته باشد. در مجموع، نتایج مطالعات نشان می‌دهد که نظام بی‌خاک‌ورزی چنانچه همراه با روش‌های حفاظتی دیگر نظیر مدیریت بقایای گیاهی باشد، باعث افزایش و پایداری عملکرد می‌شود (Zhao *et al.*, 2017).

تأثیر گیاه پوششی بر صفات عملکرد بیولوژیک و تعداد دانه در ردیف معنی‌دار شد (جدول ۳). به طوری که بیشترین عملکرد بیولوژیک (۲۱۰۳ گرم بر متر مربع) و تعداد دانه در ردیف (۴۴) در تیمار ماشک مشاهده شد. به‌علاوه، کمترین مقدار عملکرد بیولوژیک (۱۵۸۹ گرم بر متر مربع) در تیمار بدون گیاه پوششی اندازه‌گیری شد. تیمار خلر از نظر عملکرد بیولوژیک حد واسط (۱۹۷۳ گرم بر متر مربع) دو تیمار دیگر بود ولی به لحاظ آماری تفاوت معنی‌داری با آنها نشان نداد (جدول ۴). حمزه‌ئی و بوربور (Hamzei and Borbor, 2014) در یک مطالعه یک‌ساله اثر روش‌های مختلف شخم و گیاه پوششی را بر عملکرد ذرت و برخی خصوصیات خاک بررسی کردند. آن‌ها مشاهده کردند که از بین صفات مختلف ذرت (تعداد ردیف دانه در بلال، وزن صد دانه، شاخص برداشت، تعداد دانه در ردیف، عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک)، تعداد دانه در ردیف، عملکرد دانه و عملکرد بیولوژیک تحت تاثیر گیاهان پوششی (ماشک و خلر) افزایش معنی داری نسبت به شاهد (بدون گیاه پوششی) داشت. هم چنین یگانه پور و همکاران (۲۰۱۴) در مطالعه‌ای یک‌ساله نشان دادند که کاشت همزمان گیاهان پوششی، به ویژه شبدر، همراه با ذرت، به دلیل رقابت با رشد علف‌های هرز باعث افزایش معنی‌دار عملکرد ذرت نسبت به شاهد شد (Yeganehpoor *et al.*, 2015). دمیر و ایسیک (Demir and Işık, 2019) طی بررسی تأثیر گیاهان پوششی بر برخی از پارامترهای کیفیت خاک و عملکرد گیاه به این نتیجه رسیدند که گیاهان پوششی می‌تواند استفاده از ورودی‌های خارجی مانند کود را کاهش دهند و باعث بهبود و حفظ حاصلخیزی خاک شوند؛ به طوری که گیاهان پوششی از طریق بهبود خصوصیات فیزیکی، شیمیایی و بیولوژیکی خاک، منجر به افزایش عملکرد گیاهان زراعی خواهند شد. در واقع، کمبود بقایای گیاهی باعث می‌شود خاک کمتر به خاک‌ورزی حفاظتی پاسخ دهد و حساسیت خاک به فشردگی و فرسایش را افزایش می‌دهد (Nouri *et al.*, 2019) که در نهایت ممکن است منجر به کاهش عملکرد شود. کنگرس و همکاران (Congreves *et al.*, 2017) بیان کردند که استفاده از خاک‌ورزی حفاظتی و گیاهان پوششی موجب افزایش کیفیت خاک می‌شود. آنها همچنین اشاره کردند که رابطه مستقیمی بین بهره‌وری محصولات زراعی و کیفیت خاک در محصولات دانه‌ای وجود دارد.

جدول ٤- میانگین (± خطای استاندارد) عملکرد و اجزاء عملکرد ذرت تحت تأثیر اثرات اصلی گیاه پوششی و خاک‌ورزی

Table 4- Mean (± standard error) of yield and yield components of corn affected by main factors cover of crop and tillage

ویژگی (Property)	تیمار خاک‌ورزی (Tillage treatment) CT	MT	NT	تیمار گیاه پوششی (Cover crop) N	V	L	حداقل تفاوت معنی‌دار Least Significant Difference
عملکرد بیولوژیک Biological yield (g/m^2)	1663.2 b (±389.6)	2177.4 a (±442.7)	1824.8 ab (±513.2)	1589.4 B (±448.6)	2103.1 A (±289.4)	1972.9 AB (±566.9)	388.14
عملکرد دانه Grain yield (g/m^2)	506.6 b (±73.7)	587.9 a (±88.7)	637.1 a (±72.0)	593.7 A (±74.2)	590.3 A (±108.7)	547.5 A (±97.1)	59.55
وزن بلال Ear weight (g)	91.84 b (±11.65)	98.83 ab (±11.63)	108.38 a (±14.10)	101.67 A (±10.11)	102.38 A (±12.92)	94.99 A (±17.85)	10.674
وزن دانه در بلال Grain weights per ear (g)	62.90 c (±9.76)	73.49 b (±11.08)	81.85 a (±11.45)	74.21 A (±9.27)	74.62 A (±14.59)	69.41 A (±15.30)	7.727
وزن صد دانه Hundred grain weight (g)	10.99 b (±1.05)	11.77 b (±1.21)	13.61 a (±1.53)	11.89 A (±1.67)	12.67 A (±1.67)	11.81 A (±1.71)	1.159
تعداد ردیف دانه در بلال Number of grain rows per ear	12.89 b (±1.62)	15.89 a (±1.76)	16.33 a (±1.66)	15.67 A (±1.73)	15.11 A (±2.47)	14.33 A (±2.50)	1.411
تعداد دانه در ردیف Number of grains per row	41.7 a (±1.5)	42.7 a (±1.2)	44.3 a (±2.0)	43.1 AB (±1.8)	44.4 A (±1.2)	41.1 B (±1.5)	2.39
وزن چوب بلال Ear cob weight (g)	28.9 a (±2.5)	25.3 a (±2.00)	26.5 a (±2.8)	27.5 A (±2.3)	27.8 A (±2.6)	25. 6 A (±2.8)	4.51

میانگین‌هایی که حداقل در یک حرف مشترک هستند، فاقد تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد بر پایه آزمون LSD می‌باشند. CT: خاک‌ورزی مرسوم، MT: خاک‌ورزی حداقل، NT: بدون خاک‌ورزی، L: خلر، V: ماشک گل‌خوشه‌ای، N: بدون گیاه پوششی.

Means with at least one similar letter are not significantly (P<0.05) different based on LSD test. CT: Conventional Tillage, MT: Minimum Tillage, NT: No Tillage, L: *Lathyrus sativus*, V: *Vicia villosa*, N: No cover crop.

نتیجه‌گیری

تلفیق خاک‌ورزی حفاظتی (شامل بی‌خاک‌ورزی و کم‌خاک‌ورزی) و گیاه پوششی (شامل ماشک گل‌خوشه ای و خلر) در یک دوره سه ساله، در یک خاک لوم رسی در منطقه دستجرد همدان نشان داد که به جز محتوای فسفر فراهم سایر شاخص‌های کیفیت خاک به طور معنی‌داری در نظام کم‌خاک‌ورزی، در مقایسه با خاک‌ورزی مرسوم، بهبود یافته است. در بین نظام‌های خاک‌ورزی حفاظتی، تأثیر کم خاک‌ورزی بر بهبود شاخص‌های کیفیت خاک بیشتر از بی‌خاک‌ورزی بود. از این رو، نظام کم‌خاک‌ورزی مدیریت پایدارتری در شرایط مشابه با این آزمایش می‌باشد. به‌علاوه، هر دو نظام خاک‌ورزی حفاظتی باعث بهبود عملکرد دانه، عملکرد بیولوژیک، وزن دانه در بلال و تعداد ردیف دانه در بلال شدند. هم‌چنین، هر دو گیاه پوششی باعث بهبود اغلب شاخص‌های کیفیت خاک شدند. به‌علاوه، هر دو گیاه پوششی باعث بهبود عملکرد بیولوژیک ذرت شدند، هر چند تاثیر ماشک گل‌خوشه‌ای بر این صفت بیشتر از خلر بود. از طرف دیگر، تعداد دانه در ردیف ذرت نیز در تیمار گیاه پوششی ماشک گل‌خوشه‌ای به طور معنی‌داری بیشتر از تیمار خلر بود. در مجموع، تلفیق کم-خاک‌ورزی و گیاه پوششی ماشک گل‌خوشه‌ای به عنوان مناسب‌ترین نظام کشت از نظر بهبود شاخص‌های کیفیت خاک و عملکرد ذرت در شرایط مشابه با این آزمایش معرفی می گردند. برای توصیه‌های جامع‌تر نیاز به ادامه آزمایش در نقاط بیشتر و سال‌های متوالی بیشتر می‌باشد.

منابع

1. Adetunji, A.T., Ncube, B., Meyer, A.H., Olatunji, O.S., Mulidzi, R., & Lewu, F.B. (2021). Soil pH, nitrogen, phosphatase and urease activities in response to cover crop species, termination stage and termination method. *Heliyon 7*(1): e05980. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e05980.
2. Afzali Gorouh, H., Naghavii, H., Rostami, M.A., & Najafinezhad, H. (2019). Effect of conservation tillage and wheat residue management in some soil properties and grain yield of corn. *Iranian Journal of Soil Research 33*(1): 1-11. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22092/ijsr.2019.119050.
3. Ahmadnia, F., Ebadi, A., Hashemi, M., & Ghavidel, A. (2020). Investigating the short time effect of cover crops on physical and biological properties of soil. *Journal of Water and Soil Conservation 26*(6): 277-290. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22069/JWSC.2019.16172.3145.
4. Ahmadvand, G., & Hajinia, S. (2015). The effect of cover crop and different tillage systems on soil physical properties and yield of potato. *Journal of Crop Production 8*(4): 163-182. (In Persian with English abstract). https://doi.org/20.1001.1.2008739.1394.8.4.9.5.
5. Akala, V., & Lal, R. (2001). Soil organic carbon pools and sequestration rates in reclaimed minesoils in Ohio. *Journal of environmental Quality 30*(6): 2098-2104. https://doi.org/10.2134/jeq2001.2098.
6. Asadi, M.E., Feyzbakhsh, M.T., & Razzaghi, M.H. (2016). Study of silage maize yield and yield components under different managements of tillage. *Journal of Water and Soil Conservation 23*(3): 151-170. (In Persian with English abstract). https://doi.org/10.22069/JWFST.2016.3191.
7. Blair, G.J., Lefroy, R.D., & Lisle, L. (1995). Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research 46*(7): 1459-1466.
8. Blake, G.R., & Hartge, K.H. (1986). *Bulk density*. p. 363–375, In: Klute A. (ed.) Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods, Modison.
9. Cambardella, C., & Elliott, E. (1994). Carbon and nitrogen dynamics of soil organic matter fractions from cultivated grassland soils. *Soil Science Society of America Journal 58*(1): 123-130. https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800010017x.
10. Çelik, İ., Günal, H., Acir, N., Barut, Z.B., & Budak, M. (2021). Soil quality assessment to compare tillage systems in Cukurova Plain, Turkey. *Soil and Tillage Research* 208: 104892. https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104892.
11. Congreves, K., Hooker, D., Hayes, A., Verhallen, E., & Van Eerd, L. (2017). Interaction of long-term nitrogen fertilizer application, crop rotation, and tillage system on soil carbon and nitrogen dynamics. *Plant and Soil 410*(1): 113-127. https://doi.org/10.1007/s11104-016-2986-y.
12. Demir, Z., & Işık, D. (2019). Effects of cover crop treatments on some soil quality parameters and yield in a kiwifruit orchard in Turkey. *Fresenius Environmental Bulletin 28*(9): 6988-6997.
13. Ghaffari, M., Ahmadvand, G., Ardakani, M., Mosaddeghi, M., Yeganehehpoor, F., Gaffari, M., & Mirakhori, M. (2012). Effect of cover crop residues on some physicochemical properties of soil and emergence rate of potato. *Journal of Crop Ecophysiology 21*(1): 79-90. (In Persian with English abstract)
14. Hamzei, J., & Borbor, A. (2014). Effect of different soil tillage methods and cover crops on yield and yield components of corn and some soil characteristics. *Journal of Agricultural Science and Sustainable Production 24*(3): 35-47. (In Persian with English abstract).

https://sustainagriculture.tabrizu.ac.ir/article27221906f09a3231297d54566a5c904c20d2.pdf.
15. Hiel, M.P., Barbieux, S., Pierreux, J., Olivier, C., Lobet, G., Roisin, C., Garré, S., Colinet, G., Bodson, B., & Dumont, B. (2018). Impact of crop residue management on crop production and soil chemistry after seven years of crop rotation in temperate climate, loamy soils. *Peer Journal* 6: e4836. https://doi.org/10.7717/peerj.4836.
16. Isermeyer, H. (1952). Eine einfache Methode zur Bestimmung der Bodenatmung und der Karbonate im Boden. *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung, Bodenkunde* *56*(1-3): 26-38. https://doi.org/10.1002/jpln.19520560107.
17. Komeili, H.R., Rezvani Moghaddam, P., Ghodsi, M., Nassiri Mahallati, M., & Jalal Kamali, M.R. (2016). Effect of different tillage methods and the rate of crop residues on yield, yield components and economic efficiency of wheat. *Cereal Research 6*(3): 323-337 (In Persian with English abstract)
18. Latifi, S., Hauser, M., Raheli, H., Movahhed Moghaddam, S., Viira, A.-H., Gökcin Ozuyar, P., & Azadi, H. (2021). Impacts of organizational arrangements on conservation agriculture: insights from interpretive structural modeling in Iran. *Agroecology and Sustainable Food Systems* *45*(1): 86-110. https://doi.org/10.1080/21683565.2020.1751375.
19. Merante, P., Dibari, C., Ferrise, R., Sánchez, B., Iglesias, A., Lesschen, J.P., Kuikman, P., Yeluripati, J., Smith, P., & Bindi, M. (2017). Adopting soil organic carbon management practices in soils of varying quality: Implications and perspectives in Europe. *Soil and Tillage Research* 165: 95-106. https://doi.org/10.1016/j.still.2016.08.001.
20. Nelson, D.W., & Sommers, L.E. (1996). *Total carbon, organic carbon, and organic matter*p. 961-1010 In: Sparks D.L., Page A.L., Helmke P.A., Loeppert R.H., Soltanpour P.N., Tabatabai M.A., Johnston C.T. and Sumner M.E. (eds) Methods of Soil Analysis: Part 3 Chemical methods, Modison.
21. Nouri, A., Lee, J., Yin, X., Tyler, D.D., & Saxton, A.M. (2019). Thirty-four years of no-tillage and cover crops improve soil quality and increase cotton yield in Alfisols, Southeastern USA. *Geoderma* 337: 998-1008. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.016.
22. Page, K.L., Dang, Y.P., & Dalal, R.C. (2020). The ability of conservation agriculture to conserve soil organic carbon and the subsequent impact on soil physical, chemical, and biological properties and yield. *Frontiers in Sustainable Food Systems* 4: 31. https://doi.org/10.3389/fsufs.2020.00031.
23. Palm, C., Blanco-Canquib, H., DeClerckc, F., Gaterea, L., & Grace, P. (2014). Conservation agriculture and ecosystem services: An overview. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 187: 87-105. http://doi.org/10.1016/j.agee.2013.10.010.
24. Pradhan, A., Chan, C., Roul, P.K., Halbrendt, J., & Sipes, B. (2018). Potential of conservation agriculture (CA) for climate change adaptation and food security under rainfed uplands of India: A transdisciplinary approach. *Agricultural Systems* 163: 27-35. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.002.
25. Sithole, N.J., Magwaza, L.S., & Mafongoya, P.L. (2016). Conservation agriculture and its impact on soil quality and maize yield: A South African perspective. *Soil and Tillage Research* 162: 55-67. https://doi.org/10.1016/j.still.2016.04.014.
26. Sokolowski, A.C., McCormick, B.P., De Grazia, J., Wolski, J.E., Rodríguez, H.A., Rodríguez-Frers, E.P., Gagey, M.C., Debelis, S.P., Paladino, I.R., & Barrios, M.B. (2020). Tillage and no-tillage effects on physical and chemical properties of an Argiaquoll soil under long-term crop rotation in Buenos Aires, Argentina. *International Soil and Water Conservation Research 8*(2): 185-194. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.02.002.
27. Tabatabai, M.A., & Bremner, J.M. (1969). Use of p-nitrophenyl phosphate for assay of soil phosphatase activity. *Soil biology and Biochemistry 1*(4): 301-307. https://doi.org/10.1016/0038-0717(69)90012-1.
28. Verhulst, N., Govaerts, B., Verachtert, E., Castellanos-Navarrete, A., Mezzalama, M., Wall, P., Decker, J., & Sayre, K.D. (2010). *Conservation agriculture, improving soil quality for sustainable production systems?* p. 137-208, In: Lal R. and Stewart B.A. (eds) Advances in Soil Science: Food Security and Soil Quality. CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
29. Weil, R.R., Islam, K.R., Stine, M.A., Gruver, J.B., & Samson-Liebig, S.E. (2003). Estimating active carbon for soil quality assessment: A simplified method for laboratory and field use. *American Journal of Alternative Agriculture 18*(1): 3-17. https://doi.org/10.1079/AJAA200228.
30. Yeganehpoor, F., Zehtab Salmasi, S., Abedi, G., Samadiyan, F., & Beyginiya, V. (2015). Effects of cover crops and weed management on corn yield. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences 14*(2): 178-181. http://doi.org/10.1016/j.jssas.2014.02.001.
31. Yin-jie, Z., Wei, G., Hao-an, L., Ji-wei, T., Ruo-nan, L., Ming-yue, L., Huai-zhi, Z., & Shao-wen, H. (2022). Effects of a decade of organic fertilizer substitution on vegetable yield and soil phosphorus pools, phosphatase activities, and the microbial community in a greenhouse vegetable production system. *Journal of Integrative Agriculture 21*(7): 2119–2133. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(21)63715-2.
32. Zhao, X., Liu, S.L., Pu, C., Zhang, X.Q., Xue, J.F., Ren, Y.X., Zhao, X.L., Chen, F., Lal, R., & Zhang, H.L. (2017). Crop yields under no-till farming in China: A meta-analysis. *European Journal of Agronomy* 84: 67-75.